环冷机回转框架轻量化研究

邓学求[1]，蒋林海[2]
(1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205；2. 宝钢湛江钢铁有限公司，广东 湛江 524072)

摘要： 针对环冷机制造成本、运行功耗高等问题，本文对环冷机中的关键部件回转框架进行轻量化研究，通过建模软件和仿真分析软件对其关键部位的应力和回转框架体位移量进行仿真优化，并确定相关加工工艺优化措施。结果表明：回转框架减薄后比减薄前应力会有一定范围的小幅度提升(0～20 MPa)，但远在应力安全许可范围内；回转框架的位移变形量为 4 mm，其内外环的相对转动角度很小，也远在安全距离内。改进后的环冷机回转框架，可以降低生产原料成本约 14%。

关键词： 环冷机；回转框架；轻量化；仿真分析
中图分类号： TF046.4；TF306　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1000－8764(2022)03－0038－05
doi： 10.13403/j.sjqt.2022.03.037

Lightweight study of rotary frame of ring cooler

DENG Xueqiu[1], JIANG Linhia[2]
(1. *Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha* 410205, *Hunan, China*;
2. *Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co., Ltd., Zhanjiang* 524072, *Guangdong, China*)

Abstract: Aiming at such problems as high manufacturing cost and operating power consumption of the ring cooler, a lightweight study of rotary frame in the key component of ring cooler is conducted. Through the modeling software and simulation analysis software, the stress and the displacement of the rotary frame in the key parts are simulated and optimized, and the relevant process optimization measures are determined. The results show that there is a small increase in stress(0～20 MPa) after thinning the rotary frame compared to the stress before thinning, but it is well within the safe range of stress; the displacement deflection of the rotary frame is 4 mm and the relative rotation angle of its inner and outer rings is very small and also well within the safe distance. The improved rotary frame of the ring cooler can reduce the cost of raw materials for production by about 14%.

Key words: ring cooler; rotary frame; light weight; simulation analysis

随着国家环保意识的不断加强，绿色发展成为时代主题，由于高排放、高能耗的特点，钢铁面临着绿色发展和产业升级的严峻挑战。高温烧结冷却过程是烧结过程的重要组成部分，也是实现烧结过程能量循环的重要手段之一[1-3]。环冷机作为烧结工艺的重要冷却设备，已经有半个多世纪的应用历史。为了适应时代发展对钢铁行业节能减排的要求，研究者对环冷机进行不断升级和优化设计，但这些设计大多集中在优化环冷机密封性能及余热回收效率，或者完善一些环冷机辅助功能结构上，很少有针对环冷机主体结构的优化设计[4-5]。在实际生产中，环冷机的更新换代较频繁，引入计算机辅助工程(Computer Aided Engineering，CAE)技术可对环冷机结构进行多目标轻量化设计[6]，对实现设备的减重，降低环冷机的建设成本和运行成本，提高企业的经济效益，助力钢铁行业节能减排意义重大。

本文通过三维建模软件对环冷机中的关键部件回转框架几何模型，以轴承座处、圆管焊

收稿日期：2021－10－05；修回日期：2022－01－24
作者简介：邓学求(1982—)，男，高级工程师，从事烧结球团及直接还原、二次资源综合利用、钢铁冶金环境保护等方面的研究工作。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

接处和支撑钢板处等关键部位几何尺寸作为参数变量，建立相应参数化几何模型；并利用仿真软件施加相应载荷和约束进行仿真计算，分析上述三处受力情况以及回转框架体位移量，并通过试验验证仿真结果的有效性和可靠性，最后对加工工艺进行优化进行阐述。

1　回转框架几何模型

由于合理的参数化几何模型是仿真优化设计的基础与保证，因此本文根据回转框架的工程图在建模软件中建立三维几何模型的外环梁、内环梁、轴承座和圆管等(图 1)关键位置尺寸设置参数，建立参数关系，实现几何模型参数设计。

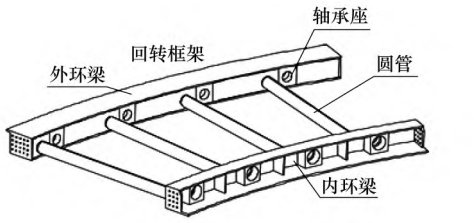


图 1　回转框架几何模型

Fig. 1　Geometric model of rotary frame

1.1　数学模型

环冷机是一种高温烧结矿冷却装备，一般用于将高温烧结矿(大于 800 ℃)冷却到规定温度(150 ℃)以下。作为重型冶金工艺设备，环冷机回转框架质量是考虑的关键指标之一，该指标对设备运行能耗、运行成本和建设成本具有决定性影响。环冷机回转框架机械载荷主要由回转框架自身重力及外部载荷两部分组成。

(1) 回转框架自身重力:

$$G = G_1 + G_2 \tag{1}$$

式中: G_1 为车体重力，N; G_2 为轴重力，N。

(2) 承担外部载荷:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 - Q_4 \tag{2}$$

式中: Q_1 为烧结矿重力，N; Q_2 为栏板重力，N; Q_3 为箅条重力，N; Q_4 为鼓风机风力产生的压力，N。

(3) 热应力基本方程。

回转框架在温度变化的过程中，由于局部温差的存在，热应力的产生不可避免。弹性体因为热膨胀产生线应变可以看作为物体在温差作用下的热应变 ε_0。三维问题的初应变:

$$\varepsilon_0 = \alpha(T - T_0)\ [1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中; α 为材料热膨胀系数; T 为物体瞬态或稳态温度场，℃; T_0 为物体初始温度场，℃。

其中，物体的瞬态或稳态温度场通过单元节点温度 T_i 插值获得:

$$T = \sum_{i=1}^{n} N_i(x,y,z)\, T_i \tag{4}$$

式中: n 为单元节点数; $N_i(x,y,z)$ 为 C_0 型插值函数。

其中，插值函数具有以下性质:

物体自身之间传热满足基本傅里叶定律:

$$N_i(x_j,y_j,z_j) = \begin{cases} 0 & (j \neq i) \\ & (j = i) \end{cases} \tag{5}$$

$$q = \frac{\Phi}{A} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \tag{6}$$

式中: q 为热流密度，J/m^2; Φ 为热量，J; A 为截面面积，m^2。

1.2　工况分析

运动状态下的回转框架主要受四部分力:回转框架通过轴承施加的压力、自身的重力、磨擦板对回转框架的摩擦力(电机转动)以及轨道的支撑力。根据此受力分析，对回转框架做如下的载荷施加: ① 根据密度施加自身重力 G; ② 根据轴承座下半圆筒的面积施加回转框架给回转框架的压力 N(等效成压强); ③ 根据磨擦板与回转框架的接触面积施加摩擦力 F(等效成压强); ④ 固定轨道的竖直方向位移来模拟轨道的支撑作用，此处不添加力。

1.3　加载约束

由于环冷机为圆周周期结构，共由 20 个扇形回转框架构成，呈圆周对称结构，因此，只需要对其中一个回转框架进行应力仿真即可。

(1) 驱动力为平均到每个回转框架上的力 F，$F = f_1 + f_2$，f_1、f_2 分别为底面轨道与辊轮的摩擦力。其中只有 f_2 对应的驱动力会对回转框架圆梁有影响，因此在施加载荷时，施加 f_2 的大小。粗略计算 $F = 270$ kN; F 作用区域为上钢板 130 mm 宽度的扇形圆环，面积为 962 210 mm^2，计算得到等效表面载荷压强为 0.014 MPa。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2) 轴承座的压力: 每个轴承座压力为 88 520 N，轴承座所配合的圆筒面接触下半部分面积为 819 95 mm^2，等效成表面载荷压强为 1.1 MPa。

2 回转框架仿真结果分析

本文以其中一块回转框架分析为例，其上布置有 8 处轴承座(图 2 中对应的 1－8 号)，选取有代表性的中间(2 号)和边缘(8 号)，对该两处轴承座进行应力仿真分析，结果如图 4 所示。同时回转框架上也布置 8 根圆管(图 3 中对应的Ⅰ－Ⅷ号)，同样选取有代表性的Ⅱ号和Ⅷ号的圆管焊接位置对其进行后续应力仿真分析，结果如图 5 所示。此外，根据选取内环梁和外环梁上两处支撑钢板进行应力分析，结果如图6所示; 分别对静止和运动状态的回转框架整体进行位移量仿真分析，结果如图 7 所示。

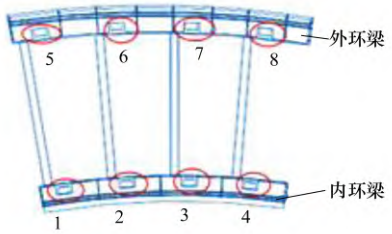


图 2 轴承座编号示意

Fig. 2 Bearing pedestal

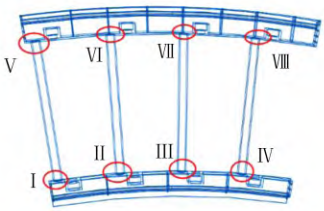


图 3 圆管编号示意

Fig. 3 Circular pipe number

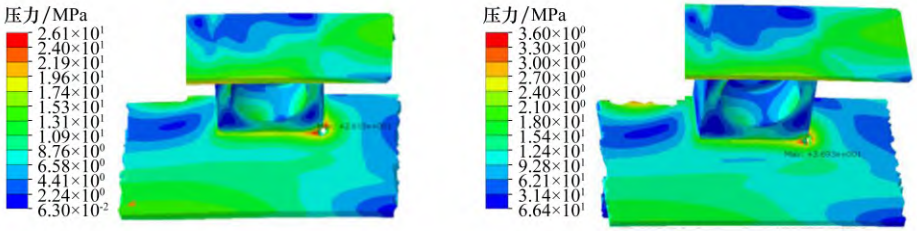


图 4 轴承座处应力分析 2 号(左)和 8 号(右)

Fig. 4 Stress analysis at bearing pedestal No. 2(left) and No. 8(right)

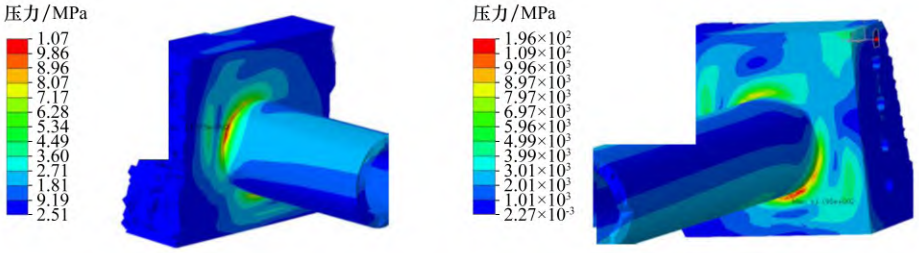


图 5 圆管焊接处应力分析Ⅱ号(左)和Ⅷ号(右)

Fig. 5 Stress analysis of welded joint of circular pipe No. 2(left) and No. 8(right)

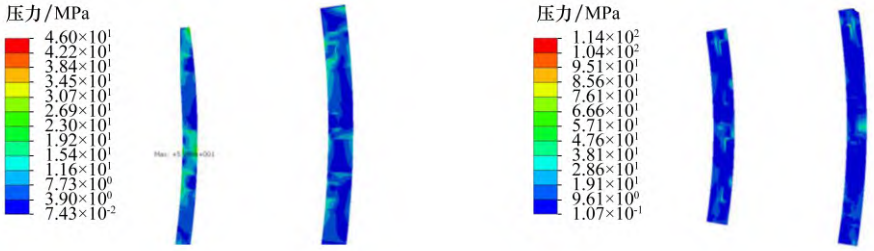


图 6 支撑钢板应力分析

Fig. 6 Stress analysis of supporting steel plate

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

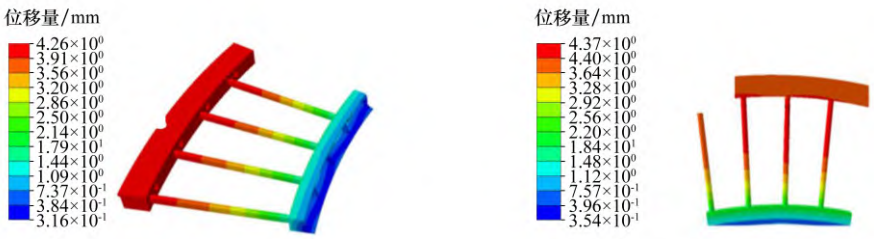


图 7　回转框架位移量分析

Fig. 7　Displacement analysis of rotary frame

由图 4 可知，两处轴承座均在与支撑钢板连接处应力值达到最大，最大值为 9.788 MPa，远低于安全许可应力值(150 MPa)，故可以在与轴承相连接处进行轻量化处理。由图 5 可知，两处圆管梁均在与支撑钢板连接处仿真应力达到最大值，为 11.950 MPa，远低于安全许可应力值为 235 MPa，因此可以对圆管中间部位结构重新设计，进行轻量化处理。由图 6 可知，回转框架内外两处支撑钢板均在向心处应力较离心面大，最大值为 114 MPa，但均低于安全系数 235 MPa，可以减少支撑钢板厚度进行轻量化再设计。由图 7 可知，在静止和运动状态下，回转框架最大位移变形量仅有 4 mm 左右，有轻量化空间，为后续轻量化设计奠定了基础。

3　优化后回转框架仿真分析

根据以上分析，本文应用结构轻量化设计方法对回转框架进行减薄再设计，以回转框架质量最小化为目标。将圆管壁厚从 32 mm 调至 20 mm，外环梁和内环梁中的支撑钢板厚度减少 10 mm，轻量化后回转框架总体质量减少约 14%。通过有限元仿真分析软件，对轻量化后回转框架改进部位分析其应力分布及位移量，仿真结果如图 8～11 所示。

根据各个部位的对比结果显示:

(1) 由图 4 和图 8 可知，相同部位有同样的应力分布区域，圆管以及轴承座的应力值与轨道处的约束位置有关，即在环冷机转动过程中，

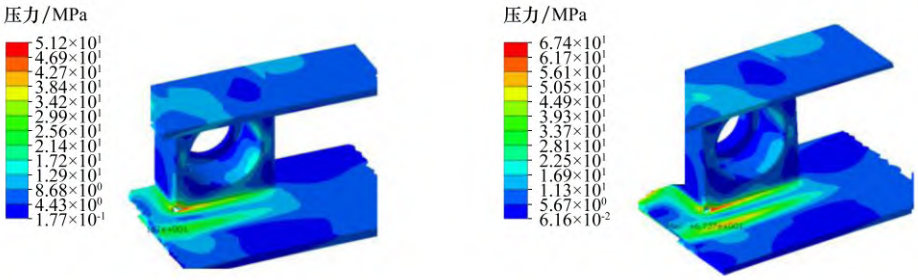


图 8　轴承座处应力分析 2 号(左)和 8 号(右)

Fig. 8　Stress analysis at bearing pedestal No. 2(left) and No. 8(right)

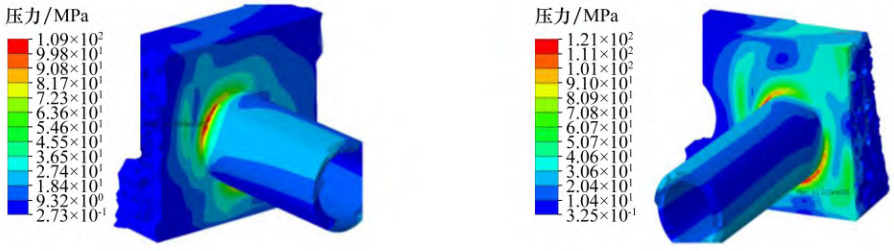


图 9　圆管焊接处应力分析Ⅱ号(左)和Ⅷ号(右)

Fig. 9　Stress analysis of welded joint of circular pipe II(left) and VIII(right)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

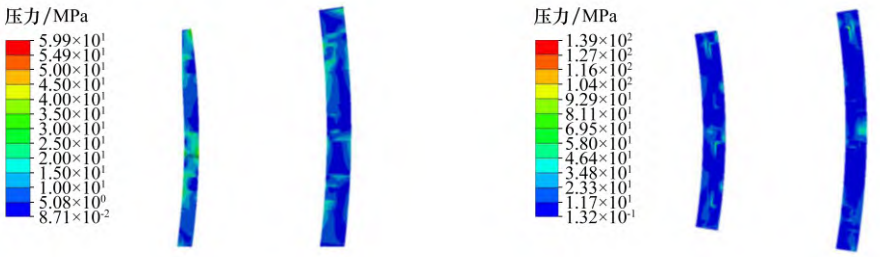


图 10 支撑钢板应力分析

Fig. 10 Stress analysis of supporting steel plate

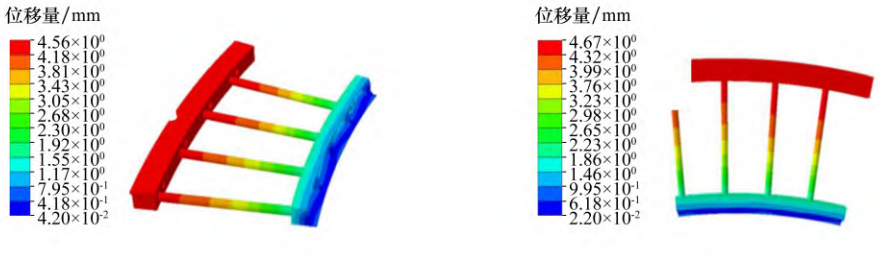


图 11 回转框架位移量分析

Fig. 11 Displacement analysis of rotary frame

底部滚轮接触位置周围的轴承座与圆管的应力较大，越靠近该接触位置的应力越大。

(2) 由图 5 和图 9 可知，减薄之后的模型与原模型相比较，焊接处的应力有 0 ~ 20 MPa 的增幅，周边应力值变化幅度很小约在 10 MPa 以内。

(3) 由图 6 和图 10 可知，相同壁厚(32 mm 或 20 mm) 的圆管下，减薄钢板厚度，应力逐渐增大；相同钢板厚度下，20 mm 壁厚圆管比 32 mm 壁厚圆管应力小，但是应力值区域有所扩大，圆管的整体弯曲变形(位移) 变大；一根圆管的两端应力不同(外环小，内环大)，其主要是因为外环圆管焊接处有肋板支撑。

(4) 由图 7 和图 11 可知，排除掉一些应力集中区域的特殊位置，整个回转框架的应力值在 100 MPa 以下，远小于屈服应力值 235 MPa；位移在周向上的值为 4 mm，考虑到回转框内外环的距离有 3 ~ 4 m，因此内外环的相对转动角度很小。

4 回转框架加工工艺

由于环冷机回转框架(图 12) 外形尺寸与结构的特殊性，其加工难度为整个环冷机设备中最高。为此，本文提供对回转框架轻量化后加工工艺的优化。

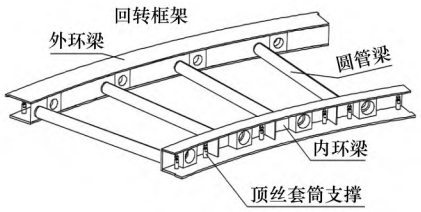


图 12 回转框架整体示意

Fig. 12 Overall schematic diagram of rotary frame

4.1 环形梁高度加工工艺

如果环梁不能满足等高要求，误差较大，在实际安装过程中会对设备造成很大影响，会缩短相关密封件的使用寿命，从而降低其经济性。具体使用过程：先向左转动顶升螺钉，完成张拉和定距工作；再使用右侧螺旋千斤顶完成收缩和拆卸。环形梁的高度偏差可以减小到 1 mm 以下。

4.2 法兰板加工工艺

法兰盘先钻铣端面，然后借助工装定位，完成焊接操作。整个旋转架焊接完成后，用端面法兰定位板以旋转架上的平面为基准，使得在垂直方向上法兰板的尺寸满足相应要求。同时满足法兰盘的其他加工定位参数要求。

(下转第 50 页)

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

31(4):19 - 24.

[7] 李金莲,朱建伟,宫作岩,等. 铁矿球团复合黏结剂技术经济评价[J]. 鞍钢技术,2020(2):18 - 24.
LI Jinlian,ZHU Jianwei,GONG Zuoyan,et al. Economic evaluation on technologies for composite binders for iron ore pellets[J]. Angang Technology,2020(2):18 - 24.

[8] 谢小林,段婷,郑富强,等. 改性复合黏结剂制备磁铁矿氧化球团研究[J]. 金属矿山,2018(1):79 - 83.
XIE Xiaolin,DUAN Ting,ZHENG Fuqiang,et al. Study of magnetite oxidized pellet prepared by modified composite binder[J]. Metal Mine,2018(1):79 - 83.

[9] 郑银珠,彭志坚. 铁矿球团复合黏结剂的试验研究[J]. 烧结球团,2009,34(5):28 - 33.
ZHENG Yinzhu,PENG Zhijian. Experimental study on iron ore pelletizing composite binder[J]. Sintering and Pelletizing,2009,34(5):28 - 33.

[10] 魏国良,付国伟,吕志义,等. 包钢球团配加复合黏结剂替代膨润土研究[J]. 包钢科技,2020,46(3):19 - 22.
WEI Guoliang,FU Guowei,LÜ Zhiyi,et al. Study on substituting bentonite with cobinder for pellet of Baotou Steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel,2020,46(3):19 - 22.

[11] 张玉柱,边妙莲,刘鹏君,等. 膨润土理化性能对球团性能影响的研究[J]. 烧结球团,2006(2):21 - 24.
ZHANG Yuzhu,BIAN Miaolian,LIU Pengjun,et al. Influence of bentonite properties on pellet performances[J]. Sintering and Pelletizing,2006(2):21 - 24.

[12] 葛方红. 国内外膨润土指标对铁矿球团性能影响的探讨[J]. 烧结球团,1996(5):17 - 23.
GE Fanghong. Influence of bentonite indexes on performance of iron ore pellets at home and abroad[J]. Sintering and Pelletizing,1996(5):17 - 23.

[13] 韩卫涛. 不同种类膨润土对生球强度的影响规律[J]. 矿业工程,2015,13(4):41 - 44.
HAN Weitao. Impact rules of different bentonites to green ball strength[J]. Mining Engineering,2015,13(4):41 - 44.

[14] 钱宇,张恒,杨俊. 基于多元线性回归的飞机燃油消耗诱因分析[J]. 计算机仿真,2021,38(9):24 - 30.
QIAN Yu,ZHANG Heng,YANG Jun. Analysis on the inducement of aircraft fuel consumption based on multivariate linear regression[J]. Computer Simulation,2021,38(9):24 - 30.

(上接第42页)

5 结 论

环冷机是烧结工艺常用冷却装置,本文利用仿真软件对环冷机中的回转框架组成部分进行轻量化优化设计研究。主要得出以下结论:

(1)仿真分析应力发现,轴承座均在与支撑钢板连接处应力值达到最大,最大值为9.788 MPa,故可以在与轴承相连接处进行轻量化处理;两处圆管梁均在与支撑钢板连接处仿真应力达到最大,最大值为11.950 MPa,因此可以对圆管中间部位结构重新设计,进行轻量化处理;在静止和运动状态下,回转框架最大位移变形量仅为4 mm左右,有轻量化空间。

(2)轻量化后的模型与原模型相比较,焊接处的应力有0~20 MPa的增幅,周边应力值变化幅度很小,约在10 MPa以内。排除掉一些应力集中区域的特殊位置,整个回转框架的应力值在100 MPa以下,远小于屈服应力值235 MPa。

参考文献:

[1] 王晓波. 我国铁矿行业"十三五"中期回顾及"十四五"展望[J]. 冶金经济与管理,2019(4):4 - 6.
WANG Xiaobo. Mid-term of the 13th and of the 14th for China[J]. Yejin Jingji yu Guanli,2019(4):4 - 6.

[2] 张峰,刘静波,申理仁,等. 新型环冷机回转框架及台车的制造工艺改进[J]. 烧结球团,2019,44(4):23 - 26;30.
ZHANG Feng,LIU Jingbo,SHEN Liren. Improvement of manufacturing process for rotary frame and pallet car of new type of circular cooler[J]. Sintering and Pelletizing,2019,44(4):23 - 26;30.

[3] 舒文艺. 新型环冷机设计及安装工艺研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2017.
SHU Wenyi. Research on design and installation process for the new type of ring cooler[D]. WuHan:Hubei University of Technology,2017.

[4] 范军锋,冯奇,凌天钧,等. 汽车轻量化与制造工艺[J]. 机械设计与制造,2009(7):141 - 143.
FAN J F,FENG Q,LING T J,et al. Automobile lightweight and manufacture technology[J]. Machinery Design & Manufacture,2009(7):141 - 143.

[5] 肖凯锴. 重型汽车驱动桥壳联合仿真及轻量化研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2017.
XIAO Kaikai. Research on joint simulation and lightweight of heavy-duty vehicle[D]. Chongqing:Chongqing Jiaotong University,2017.

[6] 李育锋,何彦,黄桃,等. 考虑产品制造过程环境影响的轻量化设计方法[J]. 计算机集成制造系统,2017,24(9):2306 - 2313.
LI Yufeng,HE Yan,HUANG Tao,et al. Lightweight design method considering environmental impacts in products manufacturing stage[J]. Computer Integrated Manuf acturing Systems,2017,24(9):2306 - 2313.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net